

Politechnika Wrocławskas

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

TYTUŁ PRACY:
Wieloodbiornikowy czujnik ultradźwiękowy z
mikrofonami MEMS

AUTOR:
Krystian Mirek

PROMOTOR:
Dr inż. Bogdan Kreczmer,
Katedra Cybernetyki i Robotyki

Streszczenie

Celem pracy jest budowa sonaru będącego czujnikiem ultradźwiękowym z mikrofonami MEMS. Urządzenie to ma posłużyć do wyznaczania kąta azymutu oraz elewacji badanego obiektu. Zakres prac sprzętowych obejmuje projekt i wykonanie układów elektronicznych oraz obudowy urządzenia. Część oprogramowania wymaga opracowania programu mikrokontrolera odpowiadającego za sterowanie przetwornikami, przechwytywanie sygnałów oraz komunikację z komputerem.

Pracę podzielono na rozdziały przedstawiające następujące zagadnienia. W rozdziale drugim opisany został cel projektu oraz wymagania stawiane wobec urządzenia. Trzeci rozdział przedstawia proces doboru odbiorników sygnału, które są najważniejszym elementem konstrukcji. W czwartym pochylono się nad analizą najistotniejszych problemów występujących w tego typu sonarach. Rozdział piąty opisuje specyfikację pracy z urządzeniem wod strony użytkownika. W rozdziale szóstym dogłębnie został przedstawiony proces projektowania układów elektronicznych oraz oprogramowania. Siódmy rozdział przedstawia realizację w postaci wizualizacji oraz opisu wykonanego urządzenia. Przedostatni rozdział ma na celu zobrazowanie metodologii badawczej oraz efektów działania składowych elementów całego systemu. Rozdział ostatni podsumowuje pracę dyplomową.

Cel pracy został osiągnięty częściowo. Urządzenie zostało wykonane i wszystkie jego elementy przetestowane. Sprzętowa część spełnia wszystkie cele, lecz w obecnym systemie oprogramowania, pomimo spełnienia warunków komunikacji z użytkownikiem, nie udało się dokonać zapisu danych.

Słowa kluczowe: sonar, ultradźwięki, przetwornik, czujnik, systemy wbudowane, elektronika, filtr, wzmacniacz, mikrokontroler

Abstract

Goal of thesis is to make sonar device as ultrasonic sensor with MEMS microphones. Device is going to be used to estimate angle of azimuth and elevation of tested object. Scope of hardware work includes designing and manufacturing electronics and housing of the device. Software part includes developing program responsible for control of the transducers, capturing signals and communication with PC.

Thesis is divided by chapter that explains the following issues. Second chapter shows goals and assumptions of whole project. Third chapter explains process behind choosing the right sensor. Fourth chapter analyses problems that encounters in designing sonars. Fifth chapter describes user requirements. Sixth chapter shows process of designing hardware and software. Seventh chapter describes implementation in form of photos and description. Eighth chapter shows test methodology and effects of working device. Last chapter is the summary of whole thesis.

Goal of work is accomplished partly. Device has been made and all of its components were tested. Hardware part meets all of the expectations but in current software architecture it is impossible to save captured data fast enough.

Keywords: sonar, ultrasonic, transducer, sensor, embedded system, electronics, filter, amplifier, microcontroller

Spis treści

1 Wstęp	3
2 Cel i założenia	4
3 Przegląd czujników ultradźwiękowych	5
3.1 Dobór odbiornika	5
3.2 Komercyjne rozwiązania	7
4 Analiza problemu	8
4.1 Generowanie i odbieranie sygnału ultradźwiękowego	8
4.2 Określenie kierunku nadejścia odebranego sygnału	8
4.3 Komunikacja	10
5 Specyfikacja realizacji sonaru ultradźwiękowego	11
6 Projekt konstrukcji sonaru oraz protokoły komunikacji	12
6.1 Komunikacja	12
6.1.1 Komputer → sonar	13
6.1.2 Sonar → komputer	14
6.2 Konstrukcja układów elektronicznych sonaru	14
6.2.1 Zasilanie	14
6.2.2 Nadajnik	15
6.2.3 Wzmacniacz nadajnika	15
6.2.4 Filtry sygnału audio	16
6.2.5 Progowanie sygnału	17
6.3 Konfiguracja mikrokontrolera	18
6.4 Program	21
7 Realizacja sonaru ultradźwiękowego	23
8 Testy i eksperymenty	27
8.1 Test przetwornika piezoelektrycznego	27
8.2 Pierwsze uruchomienie	27
8.3 Uruchomienie i test wzmacniacza sygnału przetwornika piezoelektrycznego	28
8.4 Test mikrofonów i filtrów	28
8.5 Test wykrywania obiektu	30
9 Podsumowanie i wnioski	32
Literatura	33
Spis rysunków	34
A Schematy i noty katalogowe	35

Rozdział 1

Wstęp

Wiele zaawansowanych współczesnych technologii czerpie pomysły bezpośrednio z natury. Jednym z takich rozwiązań jest echolokacja, wykorzystywania przez zwierzęta takie jak nietoperze czy delfiny, do nawigacji w przestrzeni. Umiejętność ta wytworzyła się naturalnie w drodze ewolucji.

Według Wikipedii [Wikb], sonar to pojęcie obejmujące szeroką grupę urządzeń służących do komunikacji, nawigacji, detekcji i klasyfikacji obiektów znajdujących się w cieczy bądź powietrzu. Nazwa ta pochodzi z języka angielskiego i jest akronimem od wyrażenia „*SOund Navigation And Ranging*”, co tłumaczy się na „nawigacja dźwiękowa i pomiar odległości”. Urządzenia mogą wykorzystywać szeroki zakres fal dźwiękowych jako nośnika informacji, od infradźwięków, aż po ultradźwięki.

Podstawą działania sonarów jest efekt propagacji fali dźwiękowej miedzy nadajnikiem a odbiornikiem. Sonary aktywne są wyposażone w nadajnik transmitujący falę oraz odbiornik, który ją odbiera. Mierzone są zatem parametry sygnału odbitego od wykrywanego obiektu, takie jak czas powrotu fali czy, w przypadku bardziej zaawansowanych konstrukcji, również kierunek, z którego nadchodzi fala.

Obecnie sonary wykorzystywane są w bardzo wielu dziedzinach nauki, przemyśle, medycynie, wojsku a także w życiu codziennym. Sonary bardzo dobrze radzą sobie w wodzie, ze względu na większą prędkość dźwięku w gęstszych ośrodkach. Najbardziej znanym zastosowaniem tych urządzeń jest aparatura pomiarowa będąca na wyposażeniu łodzi podwodnych oraz rybołówstwo. Pozwalają one na precyzyjne określenie kształtu den mór oraz rozmiary ławic. W łodziach podwodnych system ten wykorzystywany jest głównie do wykrywania obiektów kolizyjnych. Ze względu na błyskawiczny rozwój przemysłu czujniki ultradźwiękowe mają coraz to szersze zastosowanie, między innymi do automatyzacji procesów linii produkcyjnych oraz wykrywania kolizji autonomicznych robotów mobilnych. Świeście się sprawdzają również w analizie zmęczeniowej materiałów, co pozwala na wcześnie reagowanie w przypadku awarii kluczowych elementów dużych konstrukcji. Na co dzień rozwiązanie to spotkać można chociażby w samochodach wyposażonych w czujniki parkowania.

Wspomniane zastosowania to zaledwie ułamek faktycznego wykorzystania tej technologii. Pomimo stu lat rozwoju sonarów, w dziedzinie tej pozostaje wiele do odkrycia. Najbliższe lata mogą przynieść coraz to nowsze, kreatywne metody użycia ich w nieznanych dotąd przykładach.

Rozdział 2

Cel i założenia

Popularne dalmierze ultradźwiękowe wykorzystują przetworniki piezoelektryczne jako nadajniki i odbiorniki. Ich średnice wahają się w granicach od 10mm do 20mm. W przypadku prostych dalmierzy, gdy wyznaczana jest tylko odległość do obiektu, ich rozmiar nie jest krytyczny. Jednak w konstrukcjach sonarów ultradźwiękowych, które mają wyznaczyć również kierunek przylotu sygnału, rozmiar ten jest istotny. Jeżeli kierunek przylotu jest wyznaczany w oparciu o przesunięcie fazy odbieranego sygnału, wzajemna odległość odbiorników nie powinna przekraczać pół długości fali emitowanego sygnału. Wykorzystywane powszechnie przetworniki ultradźwiękowe pracują z częstotliwością 40kHz. Pół długości fali akustycznej w powietrzu dla tej częstotliwości to ok. 4,3 mm. Drugim warunkiem stosowalności tego podejścia jest, możliwość modelowania odbiorniki sygnału jako punkty materialne. Od strony technicznej oznacza to, że apertury tych odbiorników powinny być możliwe małe w stosunku do długości fali. Kryteriów tych nie spełniają popularne odbiorniki piezoelektryczne.

Celem niniejszej pracy jest konstrukcja sonaru pozwalającego wyznaczyć odległość do miejsca odbicia sygnału oraz kierunku nadejścia sygnału. Pozwalać ma to tym samym na precyzyjną lokalizację obiektu. Zakłada się, że źródłem sygnału będzie przetwornik piezoelektryczny pracujący z częstotliwością 40 kHz. Wyznaczanie kierunku przylotu ma zostać zrealizowane w oparciu o przesunięcie fazy odbieranego sygnału. Chcąc spełnić opisane powyżej warunki, jako odbiorniki zostaną zastosowane 3 mikrofony analogowe produkowane w technologii MEMS. Sonar powinien udostępniać komunikację poprzez interfejs USB. Dostępna powinna być też możliwość konfiguracji jego pracy, tzn. ilość pobudzeń generujących emitowany sygnał oraz czas opóźnienia przejścia w tryb odbioru. W ramach niniejszej pracy należy też zrealizować podstawowe oprogramowanie dla komputera typu PC, które pozwoli sterować sonarem, wykonać niezbędne pomiary oraz obliczenia. Dysponując tym oprogramowaniem należy przeprowadzić serię eksperymentów, które pozwolą zbadać i zweryfikować podstawowe własności sonaru.

Rozdział 3

Przegląd czujników ultradźwiękowych

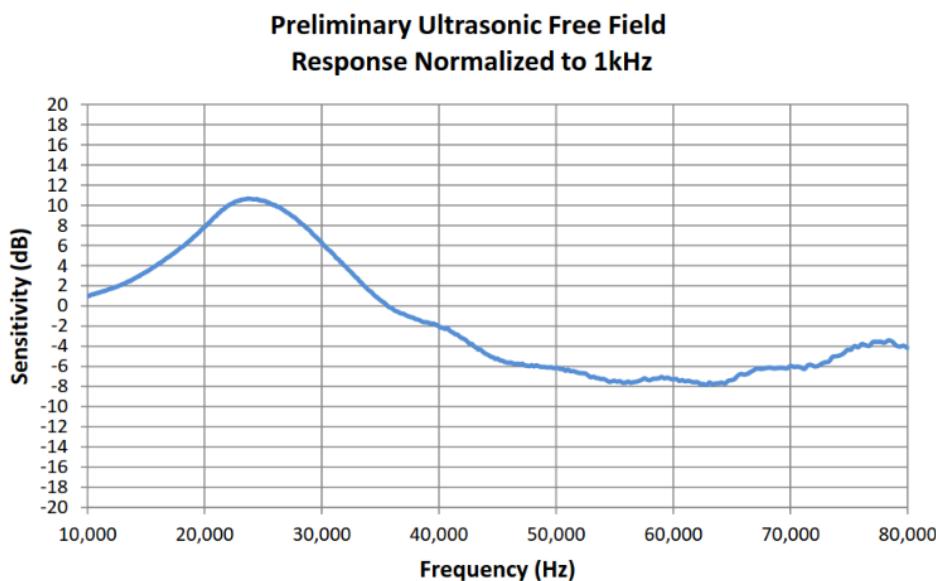
Jedną z najważniejszych części projektu jest układ odbiorczy. Wybrane elementy muszą spełniać szereg założeń niezbędnych do poprawnego zrealizowania zadania. W tym rozdziale przedstawiony jest proces doboru elementów składających się na finalny odbiornik.

3.1 Dobór odbiornika

Wymagania jakie powinien spełniać odbiornik wynikają bezpośrednio z założeń projektu. Pierwszym z nich jest czułość przetwornika na częstotliwości ultradźwiękowe. Na rysunku 3.1 widzimy przykładowy wykres pasma przenoszenia mikrofonu w odniesieniu do częstotliwości 1 kHz. W przypadku docelowego czujnika istotna jest czułość w wąskim paśmie 40 kHz. Czułość ta nie powinna znaczaco odbiegać poniżej czułości referencyjnej, a w tym przypadku wynosi -2 dB, co jest akceptowalną wartością. Dokładna częstotliwość podyktywana jest głównie standardami branży. Większość przetworników piezoelektrycznych, służących do generowania sygnału ma swój punkt rezonansu w wąskim paśmie bliskim 40 kHz.

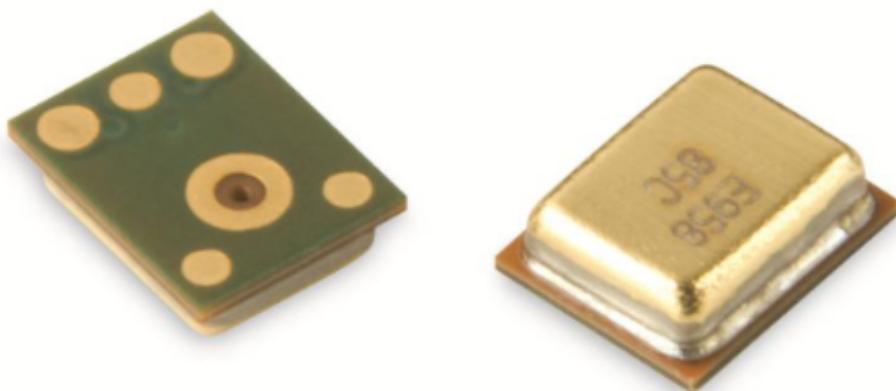
Następnym wymaganiem jest rozmiar. Wynika to z rodzaju wykonywanego pomiaru. Każdy z czujników wykrywa przejście sygnału przez poziom wartości zeroowej. Odbiorniki nie powinny być oddalone od siebie bardziej niż połowa długości fali dźwiękowej. To zapewnia, że pomiary będą dotyczyły tego samego czoła fali. W przeciwnym przypadku zrealizowane pomiary nie pozwalałyby jednoznacznie wyznaczyć kąta jej padania. Długość fali jest zależna od częstotliwości sygnału oraz jego prędkości rozchodzenia się w danym medium. Wyznaczamy ją ze wzoru 3.1, przy czym częstotliwość jest równa 40 kHz, a prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu przy temperaturze 15 °C wynosi 340,3 m/s [Wika]. Połowa długości fali to zatem 4,25 mm i tej wartości nie powinna przekraczać odległość między odbiornikami. Wszystkie czujniki tak małych rozmiarów są produkowane w technologii MEMS.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{40 \text{kHz}} = 0,0085 \text{m} = 8,5 \text{mm} \quad (3.1)$$



Rysunek 3.1 Pasmo przenoszenia mikrofonu SPU0410LR5H-QB. Źródło: [KNO13]

Kolejnym wymaganiem jest takie umieszczenie otworu ciśnieniowego w obudowie, by był skierowany on wewnątrz laminatu obwodu drukowanego. Taka konstrukcja, jak na rysunku 3.2, pozwala na stworzenie płaskiej powierzchni, tylko z otworami ciśnieniowymi czujników. Przekłada się to na mniejsze zakłócenia spowodowane odbiciami fali dźwiękowej od elementów elektronicznych.



Rysunek 3.2 Mikrofon SPU0410LR5H-QB. Źródło: [KNO13]

Ostatecznym wymaganiem była dostępność i przystępność cenowa produktu. Ze względu na tak rygorystyczne oczekiwania wybór zawęził się zaledwie do kilku pozycji. Jedną z nich był mikrofon SPU0410LR5H-QB marki Knowles [kno], który w odpowiedniej liczbie został dostarczony przez Promotora.

3.2 Komercyjne rozwiązania

Rynek oferuje rozwiązania z wykorzystaniem ultradźwiękowych czujników odległości, ale względnie niewiele firm oferuje sonary bez ruchomych elementów. Czołowym producentem urządzeń w takiej technologii jest TOPOSENS ze swoim produktem o nazwie ECHO ONE®. Rysunek 3.3, który jest zdjęciem marketingowym produktu, sugeruje, że posiada on ultradźwiękowy nadajnik oraz trzy odbiorniki we wzorze tworzącym kąt prosty.



Rysunek 3.3 TOPOSENS ECHO ONE. Źródło: <https://toposens.com/>

Rozdział 4

Analiza problemu

4.1 Generowanie i odbieranie sygnału ultradźwiękowego

Od nadajnika wymaga się, by był zdolny do emitowania mocnego sygnału tylko dla jednej częstotliwości określonej w rozdziale 3. Do tego celu idealnie nadają się przetworniki piezoelektryczne o częstotliwości rezonansowej 40 kHz. W celu zwiększenia wydajności takiego przetwornika, konieczne jest podniesienie napięcia sygnału pobudzającego. Powinno zostać to zrealizowane za pomocą wzmacniacza prądowego oraz transformatora. Sterownik nadajnika musi pozwalać na wygenerowanie dokładnie określonej ilości impulsów. Mechanizm ten umożliwia urządzeniu wykonywać sekwencje odczytu o różnych parametrach, które mogą mieć wpływ na jakość danych wyjściowych. Ze względu na wybranie mikrofonu o bardzo szerokim paśmie przenoszenia, konieczne jest zastosowanie filtrów pasmowych. Muszą mieć one szczyt skuteczności w zakresie częstotliwości rezonansowej nadajnika, pozwoli to na rozróżnienie sygnału docelowego od innych zakłóceń oraz szumu tła.

4.2 Określenie kierunku nadania odebranego sygnału

W publikacji [Kre20], do wyznaczenia kierunku nadania sygnału została użyta metoda polegająca na pomiarze przesunięcia fazowego. Może to być osiągnięte poprzez umieszczone na wspólnej powierzchni odbiorniki. Jeżeli odstępy pomiędzy mikrofonami są mniejsze niż pół długości fali odbieranego sygnału, to do pomiaru wystarczającą konfiguracją są trzy odbiorniki ustawione niewspółliniowo (patrz rys. 4.1). W przypadku gdy odległość między odbiornikami jest stosunkowo mała do odległości od wykrywanego obiektu, od którego odbity zostaje sygnał, fala dźwiękowa może być traktowana jako płaska powierzchnia. Zakładając, że t_0, t_1, t_2 to czasy, w których ta sama powierzchnia została wykryta odpowiednio przez odbiorniki R_0, R_1 i R_2 , a jednocześnie $t_0 \leq t_1$ i $t_0 \leq t_2$, to odległości odbiorników R_1 i R_2 od powierzchni w momencie dotarcia do R_0 wynoszą następująco:

$$s_1 = v_a \tau_{01}, \quad s_2 = v_a \tau_{02}, \quad (4.1)$$

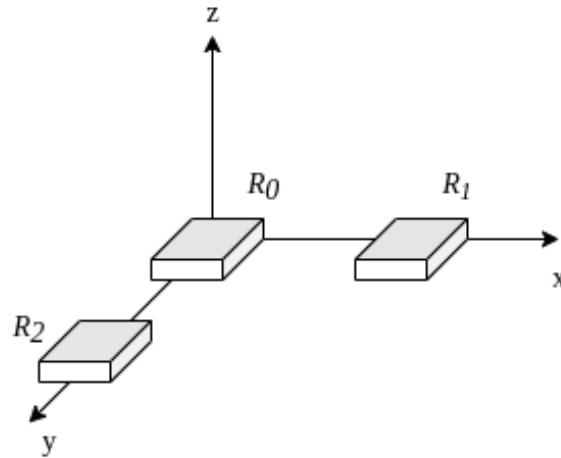
gdzie v_a jest prędkością fali, $\tau_{01} = t_1 - t_0$ i $\tau_{02} = t_2 - t_0$. Ponieważ w uproszczonym modelu fala dźwiękowa jest płaską powierzchnią musi spełnić równanie:

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (4.2)$$

gdzie a , b i c to koordynaty wektorów prostopadłych do powierzchni. Można założyć, że wektor jest znormalizowany i oznaczony jako $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ oraz

$$n_y^2 + n_z^2 + n_z^2 = 1. \quad (4.3)$$

Do wyznaczenia kąta azymutu oraz elewacji obiektu można założyć, że wektor \mathbf{n} jest skierowany przeciwnie do kierunku propagacji fali dźwiękowej. W tym przypadku oznacza to $n_x > 0$. Ponieważ wektor \mathbf{n} jest znormalizowany, bezwzględna wartość d jest odległością powierzchni od środka układu współrzędnych, który znajduje się w środku odbiornika R_0 (patrz rys. 4.1).



Rysunek 4.1 rozmieszczenie mikrofonów w przestrzeni trójwymiarowej

Biorąc pod uwagę poprzednie założenia oraz to, że koordynaty odbiorników R_1 i R_2 to odpowiednio $(0, y_1, z_1)$ i $(0, y_2, z_2)$ daje to układ równań:

$$\begin{cases} n_y y_1 + n_z z_1 = s_1, \\ n_y y_2 + n_z z_2 = s_2, \\ n_y^2 + n_z^2 + n_z^2 = 1. \end{cases} \quad (4.4)$$

Rozwiązaniem tego układu równań jest:

$$n_y = \frac{z_2 s_1 - z_1 s_2}{y_1 z_2 - y_2 z_1}, \quad n_z = \frac{y_1 s_2 - y_2 s_1}{y_1 z_2 - y_2 z_1}, \quad n_x = \sqrt{1 - n_y^2 - n_z^2} \quad (4.5)$$

Mając koordynaty znormalizowanego wektora, kąt azymutu Φ oraz elewację Θ można obliczyć za pomocą następujących równań:

$$\Phi = \arcsin \frac{n_y}{\sqrt{n_y^2 + n_x^2}} = \arcsin \frac{n_y}{\sqrt{1 - n_z^2}}, \quad (4.6)$$

$$\Theta = \arcsin \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} = \arcsin \frac{n_z}{\sqrt{1 - n_y^2}}. \quad (4.7)$$

4.3 Komunikacja

Komunikacja komputera typu PC z płytą deweloperską STM32 NUCLEO-L476RG, na której bazowany jest projekt odbędzie się przy pomocy portu szeregowego. Nowoczesne komputery są wyposażone w złącze USB, które ma niezwykły wpływ na standaryzację interfejsów w urządzeniach użytkowych. Większość płyt deweloperskich również posiada wbudowane gniazdo USB z portem szeregowym, dlatego też wybór tego rodzaju komunikacji wydaje się wręcz oczywistą decyzją. Tym samym złączem wgrywany jest również program do pamięci mikrokontrolera, co jeszcze bardziej upraszcza stanowisko testowe. Dane będą wysyłane w postaci tekstu w formie pytanie-odpowiedź, gwarantując większą elastyczność i możliwość zmiany parametrów urządzenia przez użytkownika bez konieczności przeprogramowywania mikrokontrolera. Jednocześnie to rozwiążanie nie spowoduje obniżenia efektywności komunikacji urządzenia z komputerem.

Rozdział 5

Specyfikacja realizacji sonaru ultradźwiękowego

Urządzenie, oprócz dostarczania swoich podstawowych funkcji niezbędnych do działania, może również zaoferować pewne udogodnienia w testowaniu oraz obsłudze przez użytkownika końcowego. Takim udogodnieniem jest na pewno zmiana istotnych parametrów sonaru poprzez komunikację szeregową z urządzeniem.

Komendy, które przyjmuje urządzenie, to:

- uruchomienie pomiaru – rozpoczyna kompletną sekwencję pomiarową i zwraca wynik z powrotem do urządzenia;
- zmiana liczbę impulsów nadajnika – za parametr przyjmuje wartości od 1 do 10 powtórzeń;
- zmiana wypełnienia impulsu – wpływa na moc nadajnika, za parametr przyjmuje wartości (0-199), które odpowiadają najwiekszemu i najmniejszemu wypełnieniu;
- zmiana progu wykrywania sygnału – pozwala na regulację czułości odbiornika, za parametr przyjmuje 12-bitową wartość (0-4095) przetwornika DAC;
- zmiana czasu odstępu od zakończenia nadawania do rozpoczęcia odbierania, za parametr przyjmuje czas wyrażony w taktach procesora o częstotliwości 80 MHz w zakresie liczby 16-bitowej;
- zmiana czasu końca pomiaru – stanowi o tym, kiedy mikrokontroler powinien przerwać odbieranie sygnału, za parametr przyjmuje czas wyrażony w taktach procesora o częstotliwości 80 MHz w zakresie liczby 32-bitowej.

Rozdział 6

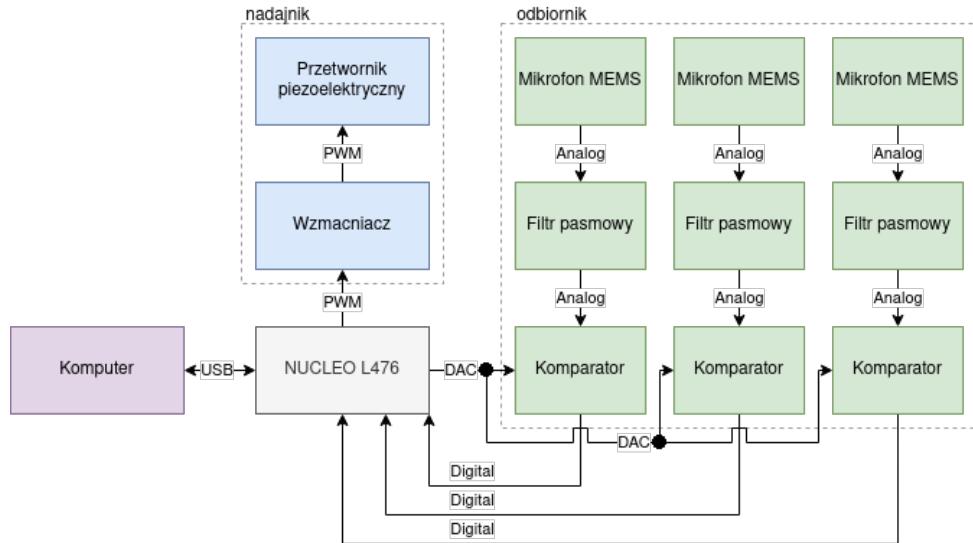
Projekt konstrukcji sonaru oraz protokoły komunikacji

Założenia konstrukcyjne to przede wszystkim prostota budowy, modularność i skrócenie czasu realizacji. Schemat funkcjonalny (patrz rys. 6.1) obrazuje, w jaki sposób połączone są składowe elementy urządzenia. Płytką deweloperską wysyła określona przez użytkownika liczbę przebiegów sygnału PWM (Pulse Width Modulation), następnie sygnał ten jest wzmacniany do poziomu 80 V by uzyskać maksymalną wydajność i trafia na przetwornik piezoelektryczny, który generuje falę ultradźwiękową. Fala ta po odbiciu się od obiektu w polu wykrywania sonaru trafia z powrotem do urządzenia, a konkretniej do mikrofonów MEMS umieszczonego na czole obudowy. Sygnał z mikrofonów jest filtrowany, by przepuścić tylko pożądane częstotliwości zbliżone do częstotliwości nadajnika, oraz wzmacniany w celu lepszej interpretacji przez dalsze układy. Po przefiltrowaniu, sygnał jest progowany. Mikrokontroler, za pomocą przetwornika DAC, ustala poziom napięcia, który wyznaczy granicę pomiędzy wysokim a niskim stanem logicznym. To rozróżnienie jest potrzebne do pobudzenia cyfrowego wejścia licznika. Zmienność tej wartości pozwala również na reagowanie tylko na sygnał o odpowiedniej amplitudzie, by móc z powrotem obniżyć próg do miejsca przecięcia się sinusoidy z napięciem odniesienia. Na tym poziomie napięcia dokładność pomiaru jest największa. Mikrokontroler, dzięki wspomnianym wcześniej licznikom odmierza czas między zboczami rosnącymi sprobowanego już sygnału. Wszystkie pomiary czasów przecień z trzech odbiorników są wysyłane we wspólnej ramce danych do komputera, gdzie za pomocą różnic w tych czasach wyznaczony zostanie dystans obiektu oraz jego odchylenie względem sonaru.

W dalszej części szczegółowo zostały przedstawione aspekty związane z komunikacją z urządzeniem, jak też elementy jego elektronicznej konstrukcji oraz oprogramowania.

6.1 Komunikacja

Wybrany został protokół UART, ze względu na to, że płytka deweloperska STM32 NUCLEO-L476RG z której skorzystano w projekcie posiada wbudowany konwerter UART→USB, co pozwala na skomunikowanie mikrokontrolera z komputerem bez



Rysunek 6.1 Schemat blokowy urządzenia

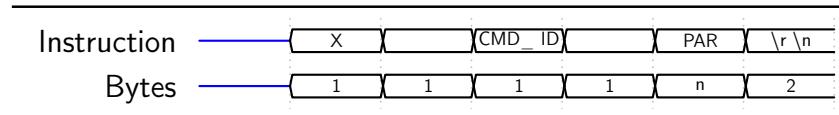
dodatkowego sprzętu. Szybkość transmisji została ustawiona na wartość 115200 b/s, a długość słowa na 8 bitów. Kontrola parzystości nie została wykorzystana, a bit stopu posiada domyślną wartość jednego bita.

W celu uruchomienia sekwencji wykrywania obiektu operator powinien wysłać komendę przykładowo o nazwie "START". Komenda taka posiada swoje ID w formie pojedynczej cyfry. Uproszczenie pozwoli zmniejszyć liczbę znaków zamieszczanych w ramce danych. Istotną zaletą komunikacji w trybie tekstowym jest to, że pozwala ona na weryfikację danych przez standardowy terminal tekstowy. Ramka danych rozpoczęcie się znakiem „X”, pomoże to programowi odfiltrować tylko dane przeznaczone dla niego. Znak ten został wybrany ze względu na to, że na pewno nie będzie występował w treści wiadomości jako element danych. Wiadomość startu wraz z opcjonalnymi parametrami takimi jak liczbę impulsów do wyemitowania czy próg czułości wykrywania sygnału, wysłane są bajt po bajcie do urządzenia. Sonar rozpoznając znak początku ramki przechodzi dalej do odczytywania ID komendy oraz jej parametrów. Po odebraniu całej wiadomości program zaczyna sekwencję pomiaru. Urządzenie wysyła do użytkownika odpowiedź, która zaczyna się znakiem rozpoznawczym "Y", a następnie zwraca numer ID komendy, na którą ta wiadomość jest odpowiedzią. Następnie przekazuje status wykonania zadania, w formie kodów błędów, liczba wykrytych przecięć zer oraz wartości liczników z każdego ze składowych pomiaru. Dane będą przetwarzane przez operacje na obiektach typu string. Pozwoli to na wycięcie odpowiednich wartości ze scalonej ramki wysłanej jako jeden długi ciąg znaków.

6.1.1 Komputer → sonar

Użytkownik systemu może wysłać z komputera instrukcję do wywołania całej sekwencji działania urządzenia. Ramka danych zaczyna się znakiem, który nie będzie nigdy występował w treści wiadomości, ułatwi to jej rozpoznanie, następnie musi zostać podany numer komendy informujący sonar jaką czynność powinien

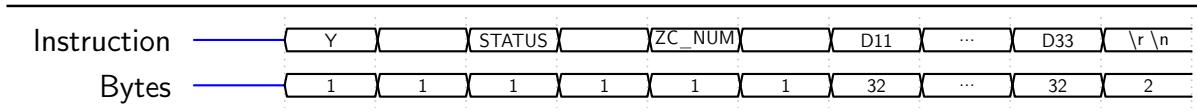
wykonac oraz parametr określający warunki tej czynności. Wartości te zostały odzielone znakiem spacji, a wiadomość zakończona znakiem końca lini i powrotem karetki. Lista dostępnych komend została szerzej opisana w rozdziale 5.



Rysunek 6.2 Ramka danych przychodzących

6.1.2 Sonar → komputer

Sonar w odpowiedzi na instrukcję wysyła ramkę danych która również zaczyna się znakiem specjalnym. Tym razem jest to litera "Y" w celu rozróżnienia wiadomości wychodzących i przychodzących. Następnie podawany jest status wykonania, liczba wykrytych przecięć sygnału z układem odniesienia oraz czasy wykrytych przecięć ze wszystkich odbiorników. Podobnie jak w ramce z komendami przychodzącymi, wszystkie dane oddzielone są znakiem spacji, a ramka zakończona znakiem końca linii oraz powrotem karetki. Dodatkowo podczas pracy urządzenie zwraca informacje diagnostyczne o wykonanych działaniach, błędach i ostrzeżeniach.



Rysunek 6.3 Ramka danych wychodzących

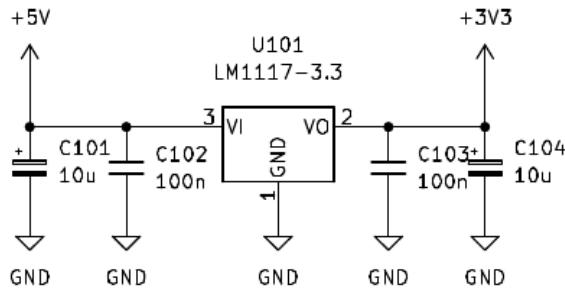
6.2 Konstrukcja układów elektronicznych sonaru

Projekt bazuje na autorskiej płytce z obwodem drukowanym, który został zaprojektowany przy pomocy otwartoźródłowego narzędzia do projektowania elektroniki KiCad [KiC]. Całe urządzenie składa się z płytki deweloperskiej oraz zaprojektowanego na cele pracy dyplomowej PCB (ang. Printed Circuit Board), które jest podłączone do Nucleo w formie nakładki (ang. shield) poprzez listwy kołkowe. Całą elektroniczną część urządzenia można podzielić na kilka bloków, ze względu na spełniane funkcje. Do bloków tych zaliczamy blok sekcji zasilania, blok nadawczy oraz blok odbiorczy. Ten ostatni zawiera zestaw filtrów sygnału odbieranego oraz komparatory progujące.

6.2.1 Zasilanie

Całe urządzenie zasilane jest z portu USB komputera, które jednocześnie służy do komunikacji. Przewód jest podłączony bezpośrednio do płytki deweloperskiej Nucleo, gdyż posiada ona już wbudowane złącze. Mimo że płytka deweloperska posiada wyprowadzenia zarówno 5V jak i 3,3V, postanowiono zaimplementować

układ stabilizatora liniowego LM1117 (patrz rys. 6.4) obniżającego napięcie do 3,3 V. Ma to na celu lepszą izolację zasilania układów analogowych od cyfrowych, co powinno przełożyć się na mniejsze zakłócenia. Blisko jego wyprowadzeń zostały również umieszczone kondensatory konieczne do poprawnej stabilizacji. Wartości tych kondensatorów zostały dobrane zgodnie z zaleceniami w nacie katalogowej. [Tex]



Rysunek 6.4 Stabilizator napięcia

6.2.2 Nadajnik

Rolę nadajnika pełni przetwornik piezoelektryczny BPU-1640T0AH12 (patrz rys. 6.5) o średnicy 16 mm i częstotliwości rezonansowej 40 kHz. Częstotliwość ta jest poza spektrum słyszalności dla ludzkiego słuchu 16-20 000 Hz [Wikc].

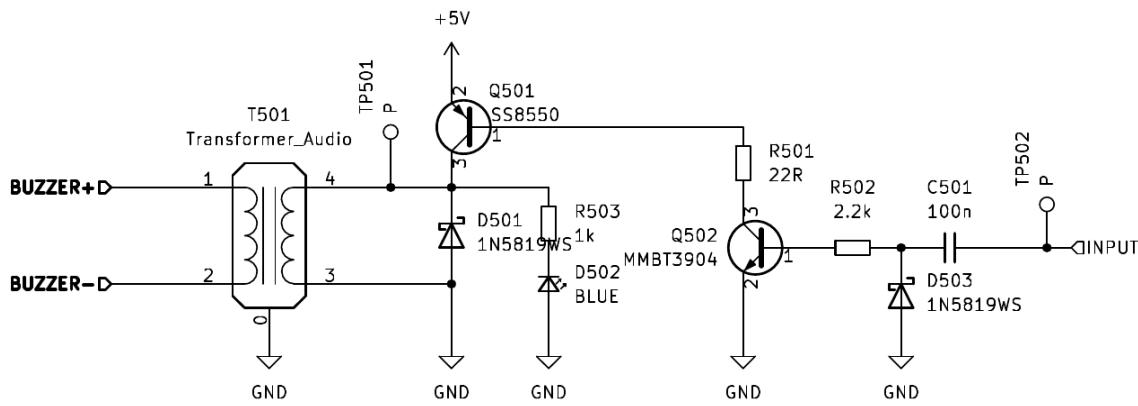


Rysunek 6.5 Nadajnik piezoelektryczny. Źródło: <https://www.manorshi.com/>

6.2.3 Wzmacniacz nadajnika

W celu uzyskania mocnego sygnału ultradźwiękowego z przetwornika piezoelektrycznego zaprojektowano układ wzmacniający z transformatorem. Sygnał nadający częstotliwość wysyłany jest z mikroprocesora, następnie jest wzmacniany parą tranzystorów SS8550 oraz MMBT3904, razem tworzących układ Darlingtona, który zapewnia duże wzmacnienie prądowe sygnału i zachowuje krótkie czasy przełączania charakterystyczne dla tranzystorów bipolarnych. Transformator w tym układzie

służy do podniesienia napięcia, które trafia na przetwornik, docelowo jest to szczytowo 80 V, co sprawia, że sygnał jest mocny. Układ posiada również zabezpieczenie przed zbyt długim czasem otwarcia tranzystora. Sygnał jest przepuszczany przez kondensator C501 (patrz rys. 6.6), co sprawia, że tylko szybkozmienne przebiegi są w stanie dotrzeć na bazę tranzystora Q502. Zbyt dłuża ekspozycja transformatora na przepływ prądu mógłaby go narazić na przegrzanie, a w konsekwencji jego uszkodzenie. Ze względu na indukcyjny charakter uzwojeń transformatora podczas szybkiej zmiany generowanego pola magnetycznego następuje konwersja tej energii do postaci prądu zwrotnego wyindukowanego na tej cewce. Aby uchronić się przed niepożądany działaniem tego zjawiska, równolegle z uzwojeniem pierwotnym sprzeżona jest dioda Schottkiego 1N5819WS, która pozwala zniwelować ten prąd. Dodatkowo, jako element ułatwiający pracę nad urządzeniem, dodany został LED, który emisuje światło w trakcie przepływu prądu przez transformator.

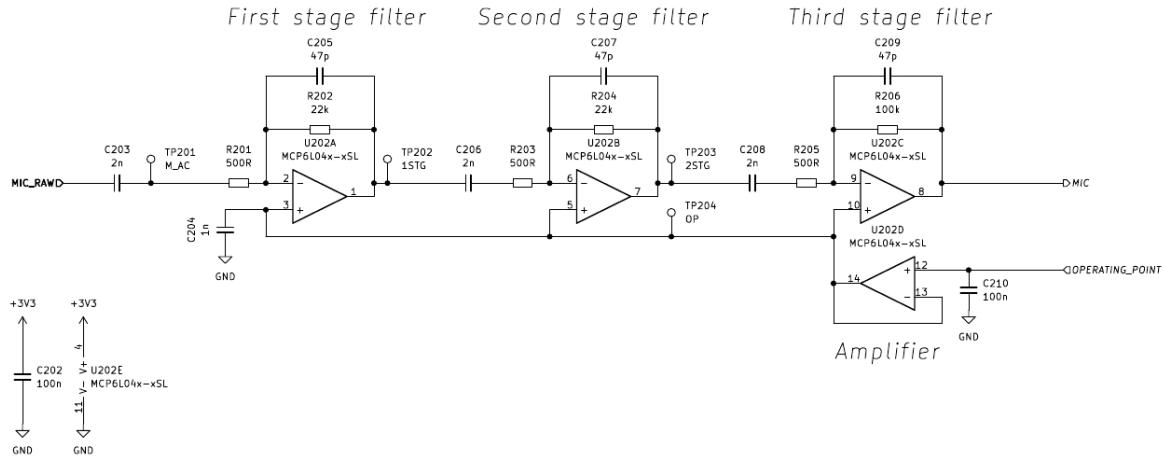


Rysunek 6.6 Wzmacniacz sygnału nadajnika piezoelektrycznego

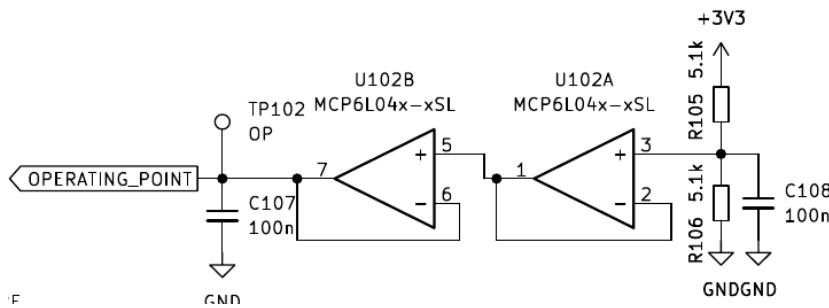
6.2.4 Filtry sygnału audio

Przyjęto, że rolę odbiorników będą pełnić trzy dookółne mikrofony MEMS, które cechują się względnie liniową charakterystyką przenoszenia pasma. Dlatego też konieczne jest zastosowanie dla każdego z nich zestawu filtrów pasmowych, które przepuszcza nam tylko i wyłącznie częstotliwości bliskie częstotliwości sygnału jaki generuje przetwornik piezoelektryczny, a zablokują wszystkie niepożądane. Po jedynym stopniu filtra, dawałby na wyjściu zbyt niski zakres poziomu napięć, z tego powodu sygnał przechodzi przez 3 stopnie wzmacniaczy operacyjnych MCP6L04 (patrz rys. 6.7). Takie rozwiązanie zarówno filtry sygnał i wzmacnia go.

Zazwyczaj układy analogowe oparte o wzmacniacze operacyjne zasilane są napięciem symetrycznym a sygnał przemienny oscyluje wokół potencjału masy. W tym wypadku ze względu na zakres napięciowy wejść mikroprocesora do zasilania wzmacniaczy operacyjnych zostało użyte pojedyncze napięcie 3,3 V zamiast symetrycznego co oznacza, że chcąc uzyskać napięcie odniesienia w połowie zakresu zasilania należy ustalić je na poziomie 1,65 V. Tę wartość ustala dzielnik napięcia z dwóch identycznych rezystorów, a wzmacniacz operacyjny zwiększa wydajność prądową takiego źródła.



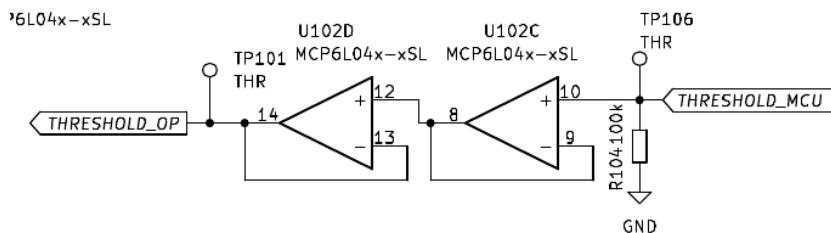
Rysunek 6.7 Zestaw filtrów dla sygnału z mikrofonów



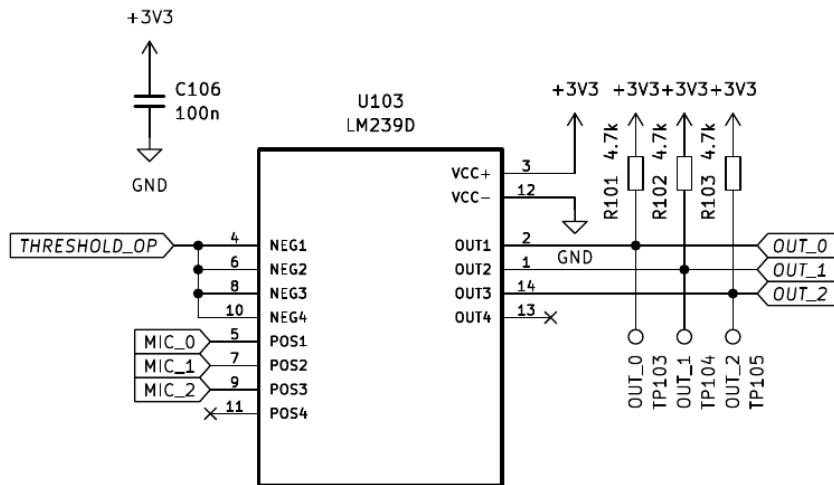
Rysunek 6.8 Wzmacniacz prądowy napięcia odniesienia

6.2.5 Progowanie sygnału

Wejścia licznika reagują na zbocza sygnału cyfrowego, co oznacza, że analogowy sygnał z wyjścia filtra musi zostać przetworzony na stany logiczne. Dokładna wartość napięcia nie jest potrzebna. Istotne są punkty przecięcia się sinusoidy z osią przebiegu. Takie zadanie idealnie spełnia komparator LM239D (patrz rys. 6.10), próg od którego sygnał ma interpretować jako wysoki stan jest podawany w formie napięcia z przetwornika DAC mikrokontrolera, dodatkowo wzmacnionego wzmacniaczem operacyjnym MCP6L04 (patrz rys. 6.9). Pozwala to na reagowanie tylko na falę dźwiękową o wystarczająco dużej amplitudzie, a po wykryciu mocnego sygnału wrócić z powrotem do poziomu napięcia odniesienia sygnału, gdzie pomiar jest najdokładniejszy.



Rysunek 6.9 Wzmacniacz wartości progowej



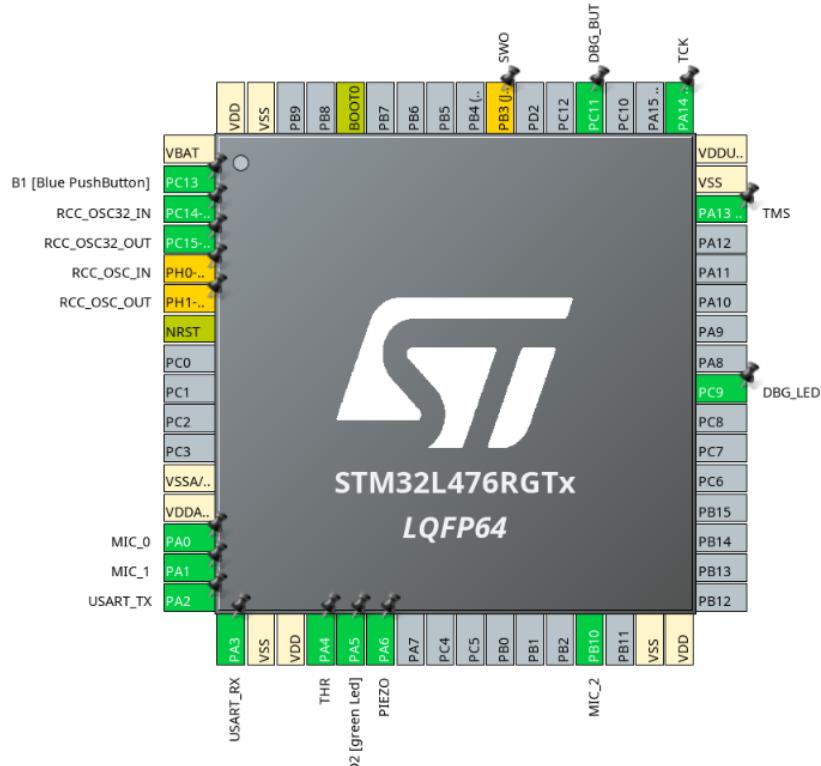
Rysunek 6.10 Czterokanałowy komparator

6.3 Konfiguracja mikrokontrolera

Mikrokontroler użyty w projekcie to STM32L476. Został on wybrany ze względu na odpowiednią liczbę liczników, przetworników i interfejsów komunikacji. Jego konfiguracja została przeprowadzona w programie STM32CUBEMX od firmy ST. Graficzny interfejs pozwala w łatwy sposób zmienić ustawienia peryferiów, takowania zegarów systemowych czy nazwy zmiennych pomocniczych przydatnych na etapie programowania. Gotowa konfiguracja wejść i wyjść została przedstawiona na rysunku 6.11, gdzie przyjęto następujące oznaczenia:

- MIC_0 – pin do pomiaru sygnału z mikrofonu nr 0,
- MIC_1 – pin do pomiaru sygnału z mikrofonu nr 1,
- MIC_2 – pin do pomiaru sygnału z mikrofonu nr 2,
- THR – pin generujący napięcie progowania(thereshold) dla komparatora zewnętrznego,
- PIEZO – pin sterujący przetwornikiem piezoelektrycznym,
- DBG_LED – pin obsługujący diodę diagnostyczną,
- DBG_BUT – pin obsługujący przycisk diagnostyczny.

Piny odpowiedzialne za pomiary sygnału z mikrofonów zostały skonfigurowane jako wejścia 32-bitowego licznika TIM2 na osobnych kanałach. Została wykorzystana funkcja input capture, która wywołuje przerwanie za każdym razem jak wykryje zbocze rosnące lub opadające sygnału. W przerwaniu zaczynana jest wartość licznika i przekazywana do bufora wiadomości. Wyjście o nazwie THR zostało skonfigurowane jako przetwornik DAC, jego celem jest wygenerowanie napięcia,

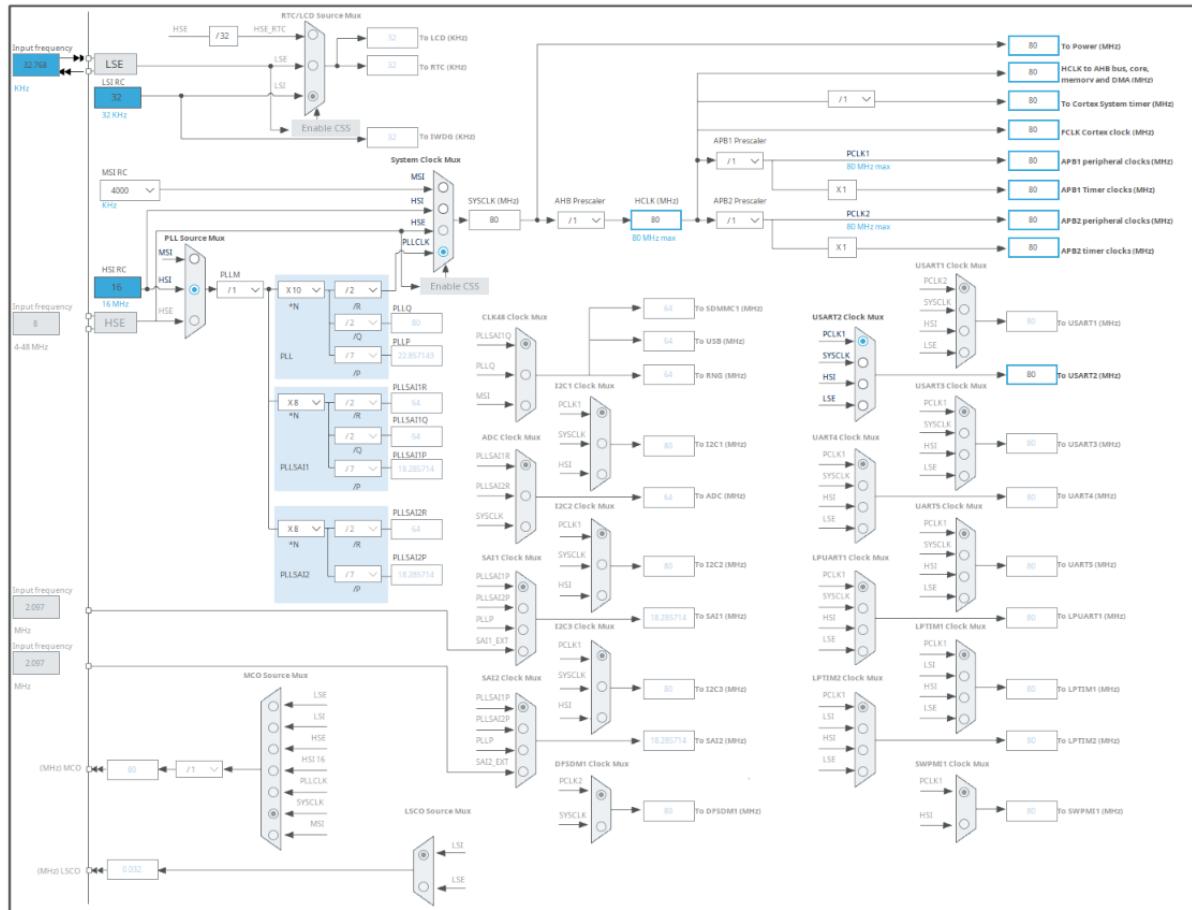


Rysunek 6.11 Konfiguracja pinów mikrokontrolera

które jest programem wykrycia sygnału dla komparatora. Wartość ta podlega zmianie w trakcie pracy urządzenia, przez co użytkownik może dopasować czułość detektora, albo zwiększyć dokładność w trakcie trwania samego pomiaru. Przetwornik piezoelektryczny sterowany jest sygnałem PWM, licznik TIM16 został skonfigurowany do pracy w PWM Generation z dodatkową opcją One Pulse Mode. Oznacza to, że licznik wykona dokładnie jeden okres sygnału o zadanych parametrach. W celu powtórzenia impulsu wyznaczoną przez użytkownika liczbę razy wykorzystany został rejestr RCR (Repetition Counter). Elementy do debugowania zostały skonfigurowane jako zwykłe wyjście dla diody, oraz zwykłe wejście dla przycisku.

Taktowanie mikroprocesora zostało ustawiane na zalecaną maksymalną wartość 80 MHz. Jak widać na rysunku 6.12 z tej wartości korzystają również wszystkie użyte w projekcie peryferia, co ma znaczenie podczas obliczania np. częstotliwości sygnału PWM czy konwertowaniu wartości licznika na czas rzeczywisty.

Peryferium komunikacji, którym w przypadku tego projektu jest peryferium UART w trybie asynchronicznym, skonfigurowano w sposób widoczny na rysunku 6.13.



Rysunek 6.12 Konfiguracja zegarów mikrokontrolera

Basic Parameters	
Baud Rate	115200 Bits/s
Word Length	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1

Rysunek 6.13 Konfiguracja peryferium UART

```
1 void HAL_TIM_IC_CaptureCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
2 {
3     switch (htim->Channel)
4     {
5         case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_1:
6             set_zero_cross(0, get_zero_cross(0) + 1);
7             set_timing_array(1, get_zero_cross(0), HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_1));
8             break;
9         case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_2:
10            set_zero_cross(1, get_zero_cross(1) + 1);
11            set_timing_array(1, get_zero_cross(1), HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_2));
12            break;
13        case HAL_TIM_ACTIVE_CHANNEL_3:
14            set_zero_cross(2, get_zero_cross(2) + 1);
15            set_timing_array(1, get_zero_cross(2), HAL_TIM_ReadCapturedValue(htim, TIM_CHANNEL_3));
16            break;
17        default:
18            break;
19    }
20 }
```

Wydruk 6.1 Odbieranie przecięć przez zero

6.4 Program

Program w całości został napisany w języku C, korzystając z powłoki abstrakcji HAL od ST electronics. Większość funkcjonalności programu udało się zrealizować na przerwaniach systemowych oraz licznikach sprzętowych w celu maksymalizacji wydajności wykonywania operacji. Pomiar przecięć sygnału z układem odniesienia jest dokonywany poprzez czytanie wartości licznika w momencie wywołania przerwania zmianą stanu na jego wejściu. Na wydruku 6.1 przedstawiony został callback odpowiadający za pomiar czasów zmiany stanu.

Wszystkie znaki przychodzące za pomocą peryferium UART są zapisywane w buforze, lecz dopiero kiedy napotkany zostanie znak końca linii, wykonywana jest operacja sprawdzenia poprawności danych w ciągu znaków. Odbieranie wiadomości w formie tekstowej opiera się na funkcjach operujących na zmiennych typu *string*. Funkcja *sscanf* widoczna na wydruku 6.2 wyciąga z tekstuowego typu danych liczby i konwertuje je na typ danych liczb całkowitych *int*. W ten sposób otrzymane dane przekazywane są do funkcji *ExecCmd*, która wywołuje podaną w parametrach komendę z parametrami. W celach diagnostycznych umieszczone zostały również linie kodu odpowiedzialne za wyświetlanie buforu po każdej odebranej wiadomości oraz komunikat błędu, jeżeli wiadomość ta nie spełnia kryteriów przyjętych podczas projektowania systemu komunikacji.

Po minięciu czasu zakończenia pomiaru, przerwanie wywołuje blok programu na wydruku 6.3 odpowiedzialny za odesłanie wyników do komputera. Za pomocą funkcji *printf* dane wysyłane pojedynczo, a pakiet danychkończony jest znakiem końca linii po wysłaniu wszystkich danych zapisanych w buforze.

```
1 void MsgHandler()
2 {
3     if (get_ready_to_send())
4         SendResults();
5
6     if (serial_available())
7     {
8         uint8_t c = serial_read();
9         buff[buf_size] = c;
10        buf_size++;
11        if (c == '\n')
12        {
13            printf("Captured MSG: %s", buff);
14            if (buff[0] == 'X' && sscanf(buff + 2, "%d %d", &cmdID, &param) == 2)
15            {
16                printf("MSG CmdId: %d, Param: %d \r\n", cmdID, param);
17                ExecCmd(cmdID, param);
18            }
19            else
20                printf("ERROR: MSG INVALID\r\n");
21            memset(buff, 0, sizeof buff);
22            buf_size = 0;
23        }
24    }
25 }
```

Wydruk 6.2 Funkcja zarządzająca wiadomościami przychodząymi i wychodzącymi

```
1 void SendResults()
2 {
3     printf("Y 1 %c ", get_zero_cross(0));
4
5     for (uint8_t i = 0; i < CHANNELS_NUM; i++)
6     {
7         for (uint8_t j = 0; j < get_pulse_count(); i++)
8         {
9             printf("%ld ", get_timing_array(i, j));
10        }
11    }
12    printf("\r\n");
13 }
```

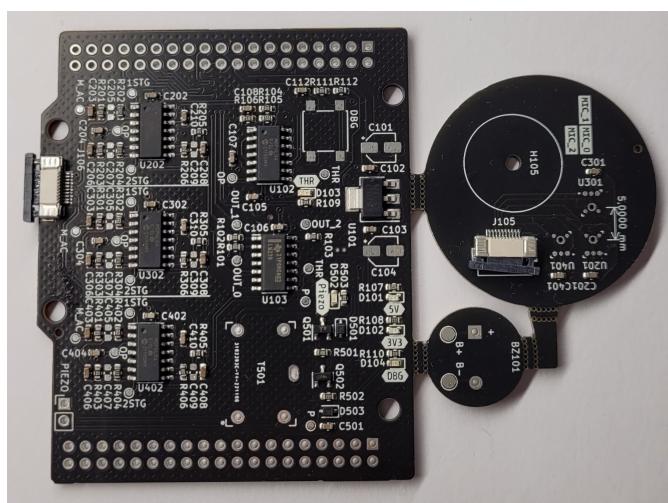
Wydruk 6.3 Funkcja tworząca ramkę wiadomości wychodzącej

Rozdział 7

Realizacja sonaru ultradźwiękowego

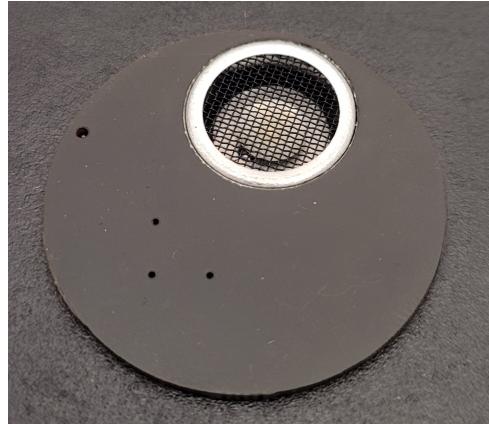
Obwód drukowany został zamówiony w zagranicznej firmie JLCPCB [jlc]. Niektóre opcje transportowe oferują korzystne czasy realizacji, wynoszące nawet do jednego tygodnia, będąc tym samym dużą konkurencją wobec lokalnych producentów. Kolejnym czynnikiem wpływającym na decyzję wyboru jest cena. Dzięki optymalizacji procesów produkcyjnych podstawową płytę dwuwarstwową można zamówić już nawet za 2\$, podczas gdy lokalnie cena jest co najmniej dziesięciokrotnie wyższa. Przekłada się to na popularność głównie chińskich dostawców wśród zarówno amatorów elektroniki, jak i profesjonalistów. JLCPCB posiada również w swojej ofercie montaż maszynowy elementów elektronicznych. Wymaga to dostarczenia odpowiednich plików produkcyjnych i listy materiałowej. Koszt montażu i komponentów jest doliczany do rachunku. Pozwala to zaoszczędzić bardzo dużo czasu podczas całego procesu wdrażania urządzenia.

W celu obniżenia kosztów produkcyjnych, wszystkie płytki składowe projektu zostały zawarte w jednym arkuszu tak jak widać na rysunku 7.1. Producent traktuje to jako jedno zlecenie, oraz nie ma potrzeby wielokrotnego konfigurowania maszyny pod montaż elementów. Łączenia miedzy modułami zostały zaprojektowane tak, aby nie stwarzały ryzyka oderwania podczas produkcji, ale jednocześnie by można było je celowo łatwo rozdzielić ręcznie.



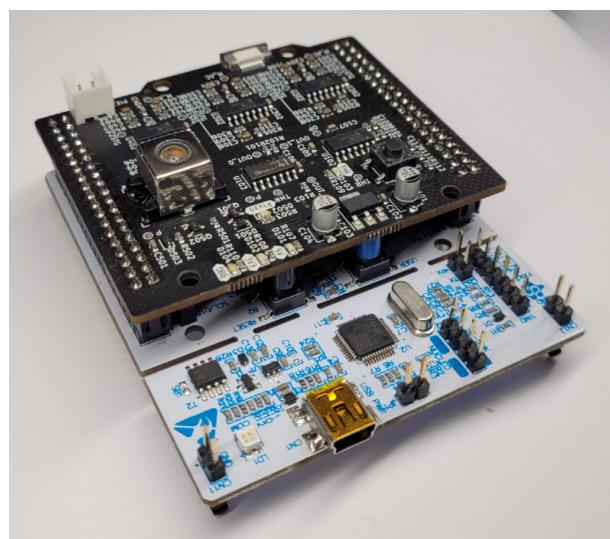
Rysunek 7.1 PCB

Moduł z przetwornikami jest okrągłą płytka widoczną na rysunku 7.2, na której mieści się przetwornik umieszczony w dużym otworze, mikrofony których układ sugerują trzy małe otwory, pełnią one funkcję kanału ciśnieniowego, to dzięki nim dźwięk dostaje się do mikrofonów będących po drugiej stronie płytki. Z głównym modułem łączy się przez taśmę FPC o rastrze 0,5 mm. Celem tworzenia osobnego modułu dla przetworników dźwięku jest konieczność umiejscowienia tych elementów na zewnątrz obudowy oraz skierowania ich w kierunku pracy urządzenia.



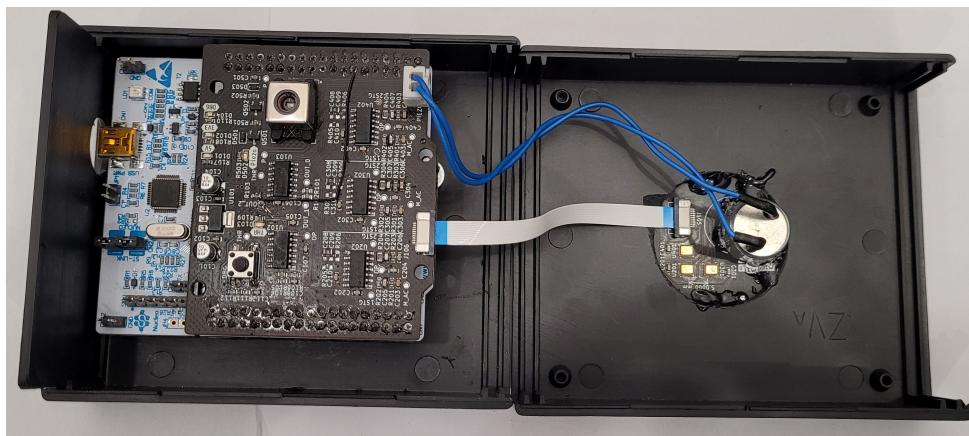
Rysunek 7.2 Moduł nadawczo-odbiorczy

Główny moduł został zaprojektowany na wzór popularnych w prototypowaniu nakładek na płytki deweloperskie. Tak jak widać na rysunku 7.3 obwód drukowany jest nałożony bezpośrednio na taką płytke, bez konieczności użycia przewodów. Moduł łączy się z Nucleo poprzez listwy kołkowe na które wyrowadzone zostały prawie wszystkie piny mikrokontrolera STM32L476 oraz dodatkowo napięcia zasilające całą płytke. Umieszczono tutaj cały układ wzmacniacza nadajnika oraz filtry, wzmacniacze i komparatory należące do bloku odbiorczego. Na krawędzi umieszczone są złącza służące do podłączenia nadajnika i odbiorników urządzenia.



Rysunek 7.3 Nakładka na Nucleo

Całe urządzenie zostało umieszczone w plastikowej obudowie marki KRADEX [kra]. Dostępne są one w wielu wariantach wymiarów, kształtów oraz materiałów. Ułatwiło to znalezienie modelu, który będzie najbardziej odpowiedni do tego zadania. Materiał obudowy został wybrany ze względu na łatwość obróbki, a także na konieczność wywiercenia dodatkowych otworów na moduł nadawczo-odbiorczy bądź na port USB widocznych na rysunku 7.4. Do montażu płytki deweloperskiej wykorzystane zostały przeznaczone do tego otwory montażowe na laminacie. Za pomocą dystansów płytka została przykręcona do obudowy, a moduł nadawczo-odbiorczy został zamocowany do górnej jej części za pomocą kleju. Inne sposoby mocowania tego modułu takie jak śruby, mogłyby zakłócić pomiar poprzez odbicie od ich powierzchni w pobliżu mikrofonów.



Rysunek 7.4 Skończony projekt w otwartej obudowie

W sposób ukazany na rysunku 7.5 prezentuje się gotowe urządzenie. Jak widać, czoło urządzenia jest możliwie płaskie by jak najmniej zakłócać pomiar. Sonar względem użytkownika udostępnia tylko złącze mini USB w celu komunikacji i zasilania urządzenia. Cała interakcja odbywa się za pomocą oprogramowania.



Rysunek 7.5 Skończony projekt

Na zrzucie ekranu widocznym na rysunku 7.6 przedstawiona została przykładowa komunikacja z urządzeniem. Pierwsza odebrana wiadomość to komenda "4" z parametrem "2800". Oznacza to, że próg wykrywania impulsu został zmieniony na wartość 2800 jednostek, o czym program poinformował w wiadomości będącej odpowiedzią na tę komendę. Następnym przechwyconym ciągiem znaków jest "X 0 0", co przekłada się na komendę numer 0, która nie przyjmuje żadnych parametrów, dlatego też w jego polu również przekazane zostało zero. Komenda ta oznacza polecenie uruchomienia sekwencji pomiarowej sonaru. W odpowiedzi na pomiar powinien być zwrócony wynik pomiaru również w formie tekstowej.

```
--- Terminal on /dev/ttyACM0 | 115200 8-N-1
--- Available filters and text transformations: colorize, debug, default, direct, hexlify, log2file, nocontrol, printable, send_on_enter, time
--- More details at https://bit.ly/pio-monitor-filters
--- Quit: Ctrl+C | Menu: Ctrl+T | Help: Ctrl+T followed by Ctrl+H
Captured MSG: X 2 1
MSG CmdId: 2, Param: 1
Number of PWM reps changed to 1
Captured MSG: X 3 180
MSG CmdId: 3, Param: 180
PWM fill changed to 180
Captured MSG: X 4 2100
MSG CmdId: 4, Param: 2100
THR changed to 2100
Captured MSG: X 5 160000
MSG CmdId: 5, Param: 160000
Wait time changed to 160000
Captured MSG: X 0 0
MSG CmdId: 0, Param: 0
Measure started
Y 1 0
```

Rysunek 7.6 Widok terminala podczas komunikacji z urządzeniem

Rozdział 8

Testy i eksperymenty

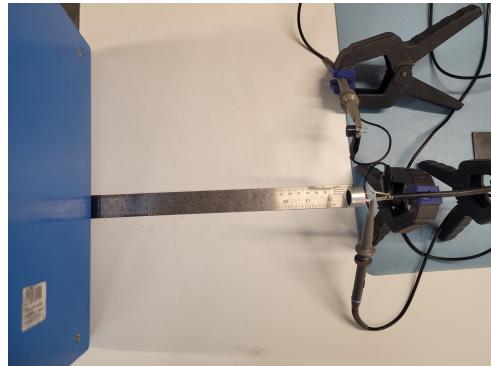
Wszystkie testy w tym rozdziale zostały przeprowadzone na czterokanałowym oscyloskopie marki Hantek [han]. Dołożono wszelkich starań, by wyniki eksperymentów były powtarzalne i przedstawione w możliwe łatwy do zinterpretowania sposób. Ze względu na charakterystykę pomieszczenia, w którym dokonywano pomiarów, wyniki mogą być obarczone dużym błędem. Ma na to wpływ ilość obiektów oraz powierzchni odbijających dźwięk.

8.1 Test przetwornika piezoelektrycznego

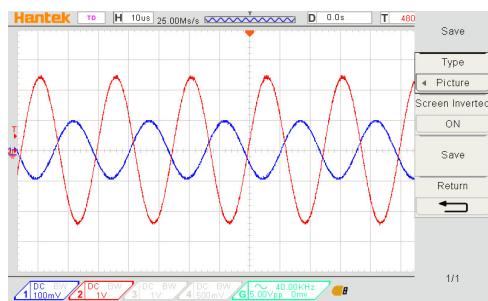
Pierwszym testem był test przetwornika, który jest nadajnikiem sygnału. Zasilono go bezpośrednio z generatora wbudowanego w oscyloskop, parametry zadane to sygnał sinusoidalny o napięciu 5 V *peak-to-peak*, czyli wartości szczytowej. Elementem odbiorczym był inny przetwornik piezoelektryczny służący tylko do testów. Jego częstotliwość rezonansowa również wynosiła 40 kHz. Przetworniki zostały skierowane w tym samym kierunku, tak by do odbiornika dotarł dźwięk odbity od powierzchni przedmiotu. Odległość od tego przedmiotu wyniosła około 25 cm, a stanowisko zostało przedstawione na rysunku 8.1. Po podłączeniu sondy oscyloskopu do odbiornika ukazał się wyraźny sygnał w kształcie sinusoidy ustawionej na nadajniku. Dźwięki otoczenia miały bardzo znikomy wpływ na zakłócenia, stanowiąc niewielki procent amplitudy. Zmiana częstotliwości o chociażby 1 kHz wiązała się kilkudziesięciokrotnym spadkiem mocy sygnału, co potwierdzało dane z noty katalogowej elementu piezoelektrycznego. Na rysunku 8.2 kolorem czerwonym ukazany jest sygnał podawany na nadajnik, zaś kolorem niebieskim zaznaczono sygnał bezpośredni z odbiornika. Sprawdzono również wpływ odległości czujników na moc i przesunięcie fazy sygnału. Zmieniając odległość nadajnika od odbiornika dało się w czasie rzeczywistym zauważać przesuwanie się fazy sygnału oraz zmianę jego amplitudy.

8.2 Pierwsze uruchomienie

PCB z przylutowanymi elementami zostało podłączone do zasilacza laboratoryjnego dostarczającego 5 V i ograniczeniem prądowym ustawionym na 100 mA. Pierwsze uruchomienie sterownika sonaru ujawniło drobny błąd projektowy, wszystkie



Rysunek 8.1 Stanowisko badawcze



Rysunek 8.2 Przebieg sygnału odebrany innym przetwornikiem piezoelektrycznym

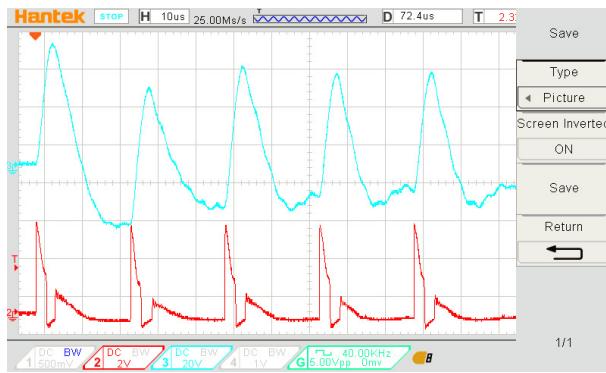
diody elektroluminescencyjne zostały przymocowane w złej polaryzacji. Zmiana ustawień diod i następnie uruchomienie, nie pokazywało oznak większych błędów. Pobór prądu wyniósł około 30mA, a temperatura elementów na płytce nie odbiegała od temperatury pokojowej.

8.3 Uruchomienie i test wzmacniacza sygnału przetwornika piezoelektrycznego

Wzmacniacz nadajnika zachował się zgodnie z założeniami projektowymi. Podając impuls o wartości napięcia 5V otrzymano na wyjściu transformatora 80V peak-to-peak. Na rysunku 8.3 kolorem czerwonym oznaczono sygnał za tranzystorem kluczującym, a kolorem cyjanowym sygnał na wyjściu transformatora.

8.4 Test mikrofonów i filtrów

Następnym testem było sprawdzenie, jak na poszczególnych etapach analogowego przetwarzania zachowuje się sygnał odbierany z mikrofonów. Przetestowanie poziomu napięć z mikrofonu wykazało, że jest on większy niż zakładano. Najlepszą amplitudę sygnału uzyskano za drugim filtrem częstotliwości. Z tym poziomem wzmacnienia sygnał z nadajnika był bardzo wyraźny i rzadko przesterowany. Jednocześnie szумy i zakłócenia były na tyle niskie, by nie mieć negatywnego wpływu na jakość sygnału. Z tego powodu trzeci stopień wzmacnienia został całkowicie po-

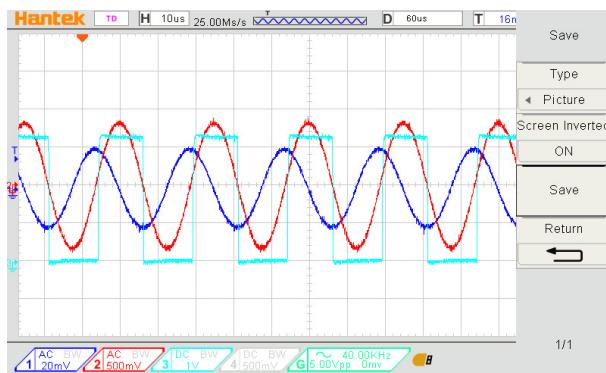


Rysunek 8.3 Wyjście transformatora z podłączonym przetwornikiem piezoelektrycznym

minięty mostkiem na płytce obwodu drukowanego. Na rysunku 8.4 widać przebiegi sygnałów:

- na niebiesko – surowy sygnał z mikrofonu,
- na czerwono – przefiltrowany i wzmacniony sygnał,
- na cyjanowo – sprogowany sygnał przez komparator, gotowy do odczytu przez mikrokontroler.

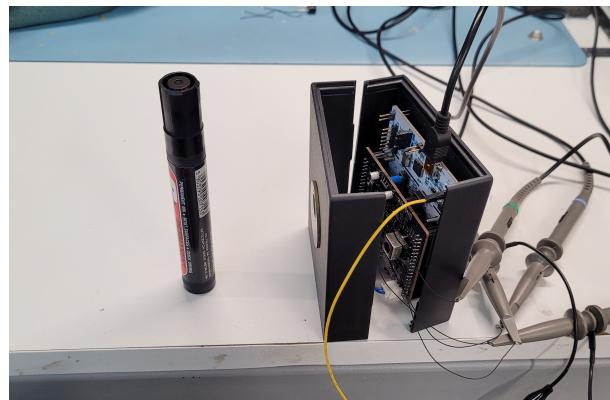
Jak wynika z pomiarów, rzeczywisty poziom wzmacnienia filtrów częstotliwości wyniósł 40 V/V. Wzmacniacz operacyjny wprowadził do sygnału zauważalne przesunięcie fazowe, jednakże w tym zastosowaniu nie ma to negatywnego wpływu na działanie układu. Wartość progowania komparatora została ustaliona na 1,65 V, czyli taka sama jak punkt pracy filtrów. Na rysunku 8.4 widać punkt przecięcia wykresów czerwonego i cyjanowego. Wyznacza on wartość napięcia progowania, która zgadza się z zadaną wartością, co świadczy o prawidłowym funkcjonowaniu komparatora.



Rysunek 8.4 Przebiegi sygnałów z pojedynczego kanału w punkcie pomiaru kolejno za mikrofonem, wzmacniaczem i komparatorem

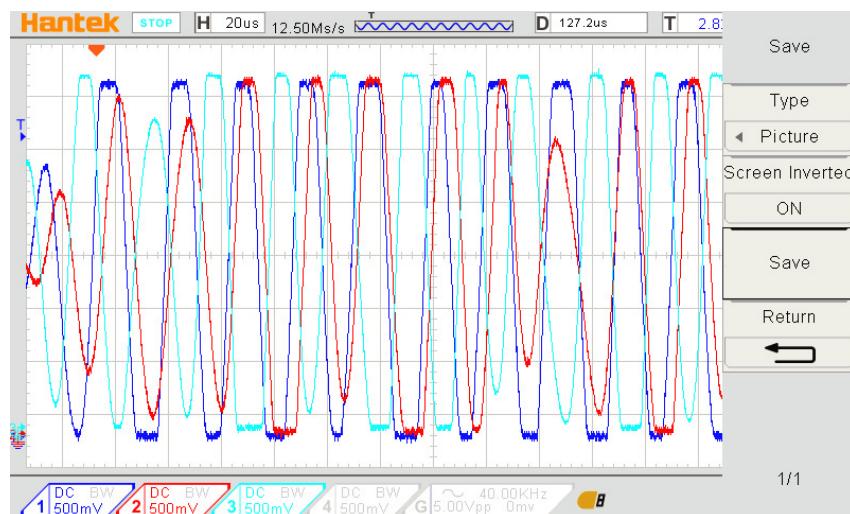
8.5 Test wykrywania obiektu

Najważniejszym testem mającym potwierdzać główne założenie projektu jest wykrycie pozycji obiektu, co okazało się być skomplikowanym zadaniem. Ze względu na echo sygnału, trudno było znaleźć dokładny okres fali, który odbity został od wyznaczonego przedmiotu. Na rysunkach 8.6 i 8.7 przedstawiono wzmocnione sygnały z trzech mikrofonów jednocześnie. Zarówno w przypadku obecności badanego obiektu, jak i bez w celu porównania. W okolicy dziewiątego okresu widać istotne załamanie, które może świadczyć właśnie o pojawienniu się przedmiotu. Obiekt postawiono w odległości około 4 cm od nadajnika (patrz rys. 8.5), ze względu na krótki bufor pomiaru. Mierzenie dłuższego okna czasowego miałoby istotny wpływ na jakość danych wyświetlanych na ekranie oscylometru.

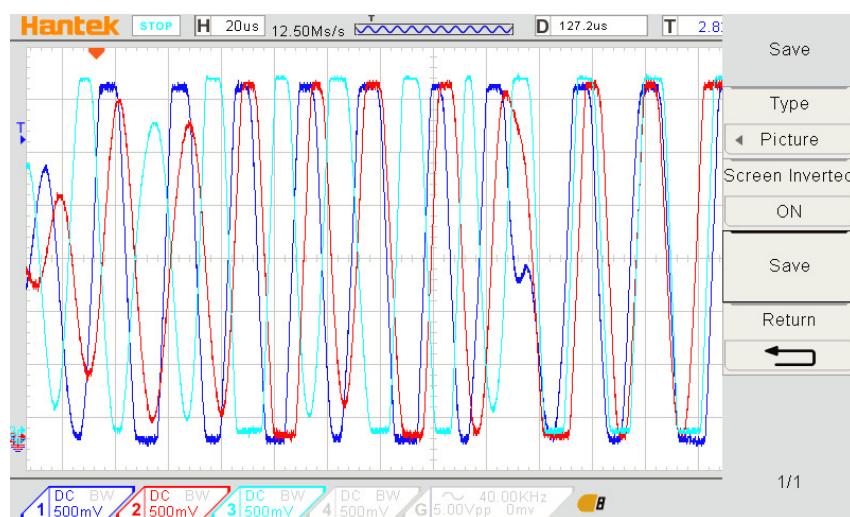


Rysunek 8.5 Stanowisko badawcze wykrywania obiektu

W pierwszych okresach przebiegu sygnału widać przesunięcie fazowe. Te okresy prawdopodobnie wynikają z bezpośredniego oddziaływania przetwornika na mikrofony, które leżą od niego w różnej odległości.



Rysunek 8.6 Odebrany sygnał bez badanego obiektu



Rysunek 8.7 Odebrany sygnał z badanym obiektem

Rozdział 9

Podsumowanie i wnioski

Praca miała na celu przedstawienie procesu projektowania i budowy sonaru. Zawiera ona dokładny opis każdego etapu, rozwija problematykę, oraz pokazuje proces podejmowania decyzji przy doborze kluczowych elementów. Dokument powinien ułatwić przyszłym konstruktorom budowę podobnego urządzenia. Sonary tego typu już teraz zyskują coraz szersze zastosowanie w przemyśle, a wraz z rosnącym rozwojem automatyki zapotrzebowanie na czujniki będzie rosło. Temat dalej pozostaje otwarty i wciąż poczynić można ogromne postępy w rozwoju tej technologii, chociażby ze względu na małą konkurencję na rynku wśród producentów tego typu urządzeń. Bardzo istotną częścią jest również analiza danych. Stosując bardziej zaawansowane algorytmy będzie można osiągnąć dużo lepsze rezultaty, powinno to pozwolić nie tylko na określenie kierunku i odległości obiektu, ale również ich kształt oraz wizualizację przestrzenną.

Informacją wartą podkreślenia jest to, że zastosowany został nieoptymalny w tym przypadku wzmacniacz operacyjny do filtrowania częstotliwości sygnału z odbiorników. Jak wskazuje nota katalogowa, jego wzmacnienie nie jest liniowe względem przekroju częstotliwości. Zastosowanie go w implementacji filtra okazało się nie w pełni nieskuteczne. Należy w tym zastosowaniu dobrać taki wzmacniacz operacyjny, który będzie miał bardziej liniowe wzmacnienie dla szerokiego pasma częstotliwości. Elementem który mógłby również usprawnić pracę nad urządzeniem jest płynna regulacja wzmacnienia sterowana przez mikrokontroler, w chwili obecnej regulowany jest tylko próg wykrycia. Istotnym problemem okazały się zbyt często występujące przerwania koniecznie do zapisu czasów pełnych okresów. Problem ten może być prawdopodobnie rozwiązany poprzez wykorzystanie peryferium DMA, który pozwala na bezpośredni dostęp do pamięci. Kolejną rzeczą, której warto poświęcić więcej czasu, to analiza danych. Należałyby przeprowadzić testy kalibracyjne w komorze bezechowej, w celu określenia ilości drgań przetwornika oraz zachowania się sonaru przy znanej ilości obiektów odbijających dźwięk. Urządzenie dostarcza wiele możliwości i widać, że radzi sobie dobrze z przetwarzaniem sygnału analogowego. Dalszy rozwój projektu powinien również objąć obudowę urządzenia, powinna ona być specjalnie zaprojektowana do pełnienia roli sonaru, co powinno zwiększyć funkcjonalność i atrakcyjność urządzenia, ułatwić montaż i wyeliminować wpływ czynników zewnętrznych na pomiar.

Literatura

- [han] Qingdao hantek electronic co., ltd. is a manufacturer of general instruments specializes in design, product, sale and service. <http://www.hantek.com/>.
- [jlc] Jlcpcb, china's largest pcb prototype manufacturer, offers 24 hours quick turn pcb prototype, pcb assembly and reliable small-batch pcb production. <https://jlcpcb.com/>.
- [KiC] Kicad is an open source software suite for electronic design automation (eda). <https://www.kicad.org/>.
- [kno] Knowles corporation (nyse: Kn) is a market leader and global provider of advanced micro-acoustic, audio processing, and precision device solutions, serving the... <https://www.knowles.com/>.
- [KNO13] KNOWLES, *Zero-Height SiSonicTMMicrophone*, 3 2013. Rev. H.
- [kra] Kradex to polski producent obudów plastikowych przeznaczonych przede wszystkim dla branży elektronicznej, elektrotechnicznej czy elektrycznej i wszędzie tam, gdzie wymagane jest zastosowanie obudów z tworzyw sztucznych. <https://www.kradex.com.pl/>.
- [Kre20] Bogdan Kreczmer, Estimation of azimuth and elevation angles of ultrasonic signal arrival by indirect phase determination. W: Roman Szewczyk, Cezary Zieliński, Małgorzata Kaliczyńska, redaktorzy, *Automation 2020: Towards Industry of the Future*, strony 359–367, Cham, 2020. Springer International Publishing.
- [Oro18] R. Orozco, *Bądź jakim jest każdy widzi*. Praca dyplomowa inżynierska, Wydział Elektroniki, Politechnika Wrocławskiego, <https://kcir.pwr.edu.pl/~much/#studenckie>, 2018.
- [Tex] Texas Instruments, *LM1117 800-mA, Low-Dropout Linear Regulator*. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf?ts=1671400004705&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [Wika] Wikipedia. Prędkość dźwięku. https://pl.wikipedia.org/wiki/Pr%C4%99dko%C5%9B%C4%87_d%C5%BAwi%C4%99ku.
- [Wikb] Wikipedia. Sonar. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Sonar>.
- [Wikc] Wikipedia. Słuch. <https://pl.wikipedia.org/wiki/S%C5%82uch>.

Spis rysunków

3.1	Pasmo przenoszenia mikrofonu SPU0410LR5H-QB	6
3.2	Mikrofon SPU0410LR5H-QB	6
3.3	TOPOSENS ECHO ONE	7
4.1	rozmieszczenie mikrofonów w przestrzeni trójwymiarowej	9
6.1	Schemat blokowy urządzenia	13
6.2	Ramka danych przychodzących	14
6.3	Ramka danych wychodzących	14
6.4	Stabilizator napięcia	15
6.5	Nadajnik piezoelektryczny	15
6.6	Wzmacniacz sygnału nadajnika piezoelektrycznego	16
6.7	Zestaw filtrów dla sygnału z mikrofonów	17
6.8	Wzmacniacz prądowy napięcia odniesienia	17
6.9	Wzmacniacz wartości progowej	17
6.10	Czterokanałowy komparator	18
6.11	Konfiguracja pinów mikrokontrolera	19
6.12	Konfiguracja zegarów mikrokontrolera	20
6.13	Konfiguracja peryferium UART	20
7.1	PCB	23
7.2	Moduł nadawczo-odbiorczy	24
7.3	Nakładka na Nucleo	24
7.4	Skończony projekt w otwartej obudowie	25
7.5	Skończony projekt	25
7.6	Widok terminala podczas komunikacji z urządzeniem	26
8.1	Stanowisko badawcze	28
8.2	Przebieg sygnału odebrany innym przetwornikiem piezoelektrycznym	28
8.3	Wyjście transformatora z podłączonym przetwornikiem piezoelektrycznym	29
8.4	Przebiegi sygnałów z pojedynczego kanału w punkcie pomiaru kolejno za mikrofonem, wzmacniaczem i komparatorem	29
8.5	Stanowisko badawcze wykrywania obiektu	30
8.6	Odebrany sygnał bez badanego obiektu	30
8.7	Odebrany sygnał z badanym obiektem	31

Dodatek A

Schematy i noty katalogowe

